

Artykuł na zaproszenie Redakcji • Invited article

Ochrona przed promieniowaniem w medycynie nuklearnej

Marjorie R. Rose

Niniejszy przegląd przedstawia ogólny zarys wymagań dotyczących ochrony pracowników przed promieniowaniem w medycynie nuklearnej. Przegląd jest wynikiem 35-letniego doświadczenia autorki w tej dziedzinie. Przedstawione są różnice w wymaganiach ochrony radiologicznej w medycynie nuklearnej i rentgenografii. Całe zagadnienie jest rozpatrywane w czterech głównych aspektach: ogólnego obrazowania w medycynie nuklearnej, leczenia emiterami beta, pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) i coraz powszechniejszego obecnie stosowania w leczeniu emiterów alfa. Nacisk położony jest raczej na praktyczne wskazówki, jak unikać typowych błędów, niż na teorię leżącą u ich podstawy. Część uwagi poświęcono różnicom w praktykach stosowanych w różnych ośrodkach.

Radiation protection in nuclear medicine

This review provides a general overview of requirements for the radiation protection of staff working in nuclear medicine, derived from the author's 35 years experience in the field. Differences between requirements in X-ray and nuclear medicine are outlined, for example, the importance of good housekeeping for protection of the nuclear medicine worker. The whole subject is considered under four headings: general nuclear medicine imaging, treatment with unsealed beta emitters, positron emission tomography (PET) and the currently expanding use of alpha emitters for treatment. The emphasis throughout is on practical advice and the avoidance of common errors and misapprehensions, rather than an account of the underlying theory. There is some consideration given to the differences in practice found between different centres.

Słowa kluczowe: medycyna nuklearna, ochrona przed promieniowaniem, obrazowanie, emitory beta, emitory alfa, pozytonowa tomografia emisyjna

Key words: nuclear medicine, radiation protection, imaging, beta emitters, alpha emitters, positron emission tomography

Wstęp

Odpowiednie utrzymanie pracowni jest równie ważnym wymogiem ochrony przed promieniowaniem w medycynie nuklearnej co czas ekspozycji, odległość od źródła promieniowania i stosowanie osłon. Są to trzy, dobrze znane każdemu pracownikowi, sposoby redukcji narażenia na promieniowanie. Istnieją także inne kwestie, które muszą oni dodatkowo wziąć pod uwagę w porównaniu z ich kolegami zatrudnionymi w pracowni rentgenowskiej. Przykładowo, źródłem promieniowania jonizującego w medycynie nuklearnej jest także pacjent. W większości przypadków jest on świadomy, że stanowić będzie źródło promieniowania także po opuszczeniu pracowni medycyny nuklearnej w trakcie powrotu do domu lub na oddział szpitalny. Dodatkowo substancje radioaktywne są często usuwane poprzez układ moczowy, dlatego trzeba

brać pod uwagę również wpływ potencjalnego skażenia toalet i kanalizacji. Osoby zatrudnione w pracowniach rentgenowskich rzadko rejestrują na swych osobistych dozymetrach dawki o istotnym znaczeniu, podczas gdy pracownicy pracowni medycyny nuklearnej zwykle tak.

Nadal istnieją na świecie poważne problemy z dostarczaniem generatorów molibdenowych. Okoliczności te są dobrze udokumentowane na stronach internetowych różnych organizacji zawodowych [1-3]. Jednak pracownice medycyny nuklearnej nadal stosują do obrazowania ^{99m}Tc ze względu na jego sześciogodzinny półokres rozpadu, emisję promieniowania gamma o energii 140 keV oraz właściwości pozwalające na znakowanie licznych związków chemicznych, wykorzystywanych do badania funkcji różnych narządów i układów. Zapis „m” w ^{99m}Tc oznacza metastabilność, co jest następną doskonałą cechą znacznika – brak jakiegokolwiek emisji beta, która podwyższałaby dawkę promieniowania, nie wpływając na jakość obrazowania.

Ochrona przed promieniowaniem w medycynie nuklearnej

Spośród różnych sposobów redukcji narażenia na promieniowanie, szczególnie istotne w medycynie nuklearnej są czas ekspozycji i odległość od źródła promieniowania, gdyż osłona przed źródłami może być niewykonalna. Tam gdzie jest to możliwe, wymagana jest osłona silniejsza niż przed promieniowaniem rentgenowskim, ponieważ przeciętna energia przekracza 50-60 keV, tj. wartość typową dla pracowni rentgenowskich. Standardowa osłona przed promieniowaniem rentgenowskim zmniejsza energię promieniowania gamma (140 keV) jedynie o połowę. Pozostawianie za tego rodzaju osłoną może prowadzić do złudnego poczucia bezpieczeństwa. Fakt, iż promieniowanie w medycynie nuklearnej jest znacznie słabsze niż w pracowniach rentgenowskich, oznacza, że technicy nierzadko pozostają w pomieszczeniu, w którym pacjent jest poddawany badaniu (w maksymalnej możliwej odległości, ale bez korzystania z osłon). Rosnąca ilość gamma kamer, sprzężonych z tomografem komputerowym, eliminuje takie sytuacje. Pacjenci poddawani badaniu stanowią źródło promieniowania, do którego należy podejść blisko, by móc zoptymalizować jakość obrazów, a technicy medyczni muszą wykonać to profesjonalnie, ale w jak najkrótszym czasie.

W trakcie przygotowywania radioizotopu najbardziej narażone na promieniowanie są palce (Ryc. 1). Przynajmniej w tej sytuacji użycie osłon jest możliwe, ponieważ źródła promieniowania są przetrzymywane w małych szklanych fiolkach, które z kolei są umieszczone w ołowianych pojemnikach. Taki pojemnik o grubości 3 milimetrów redukuje wielkość dawki promieniowania ^{99m}Tc do jednej tysięcznej. W przypadku promieniowania gamma o wyższej energii potrzebne są znacznie grubsze pojemniki (Ryc. 2).

Radioizotop jest zazwyczaj podawany dożylnie. Mimo iż w strzykawkach stosowane są osłony wolframowe lub ołowiane, nie da się uniknąć miejsc nieosłoniętych, takich jak igła i tłok. Użycie osłon utrudnia wbiżanie igły do żyły, dlatego w przeszłości zaniechano ich



Ryc. 1. Wydobycie FDG ze szklanej fiolki wewnątrz bardzo dużego ołowianego naczynia, za grubą ołowianą/ołowiano-szklaną szybą. Należy zwrócić uwagę na rękawice zapobiegające skażeniu skóry oraz na bliskość otworu kalibratora

stosowania w niektórych ośrodkach (Ryc. 3). Jednakże obecnie świadomość konieczności stosowania osłon jest powszechna [4, str. 248-9].

Szczególnie podczas wprowadzania lub usuwania igieł, dawka przenikająca do dłoni może znacznie różnić się w zależności od stosowanej pozycji. Niektóre badania wykazały od pięcio- do dziesięciokrotnej różnicy pomiędzy dawką otrzymaną w miejscu noszenia pierścionka (dozymetru), a dawką otrzymaną na opuszkę palca. Ma to znaczenie w poprawnej ocenie dawek, w kontekście maksymalnych rocznych dawek na kończyny, tj. 150 mSv dla pracowników niesklasyfikowanych oraz 500 mSv dla sklasyfikowanych. Stosowane są również dozymetry zakładane na opuszkę palca. Jednak ze względu na ich wielkość technicy wykonujący czynności przy pacjencie unikają wykorzystywania palca zaopatrzonego w dozymetr, przez co pomiar dawki promieniowania jest nieprawidłowy.

Odpowiednie utrzymanie pracowni, podobnie jak czas, odległość i stosowanie osłon, jest niezbędne, by zminimalizować ryzyko skażenia skóry lub przypadkowego spożycia radiofarmaceutyku przez pracowników lub



Ryc. 2. Ołowiane naczynie po lewej stronie o grubości 3 mm jest wystarczające do przechowywania ^{99m}Tc . Środkowe, dużo grubsze naczynie, jest używane do przechowywania ^{131}J odu. Pokrywy są zaplombowane taśmą ostrzegającą przed promieniowaniem. Grubsze ołowiane naczynia są zbyt ciężkie, by je podnieść, dlatego dodano zapięcie do naczynia zaprojektowanego dla ^{131}J odu, które zabezpiecza przed przypadkowym otwarciem pokrywy



Ryc. 3. Osłony do strzykawek o różnych rozmiarach. Dwie po prawej stronie przeznaczone są dla emiterów gamma o wyższej energii, dwie po lewej dla ^{99m}Tc i radionuklidów o zbliżonej energii promieniowania gamma. Każda zawiera szklano-ołowianą wkładkę do odczytu poziomu płynu i zapieczęcie, by strzykawka nie ześlizgiwała się z osłony

pacjentów (z powierzchni skażonych dłoni). Nawet niewielki, trudny do zauważenia wyciek bezbarwnego płynu, jakim jest większość radioizotopów, może stanowić źródło o dużej aktywności: rzędu dziesiątek MBq na 0,05 ml. W skażonych obszarach przez pierwszą godzinę mogą się utrzymywać dawki skórne rzędu setek mSv. Jednym ze sposobów uniknięcia takiej sytuacji jest stosowanie rękawiczek podczas przygotowywania roztworu. Jeśli dojdzie do skażenia radiofarmaceutyką, można go szybko zmyć. Na szczęście promieniowanie jest łatwo wykrywalne przez detektory, a technicy często myją i obserwują swoje dłonie w trakcie przygotowywania i wstrzykiwania radioizotopów. Ostateczne umycie dłoni przed posiłkiem chroni przed skażeniem w trakcie jedzenia.

Leczenie emiterami beta

Podczas gdy promieniowanie gamma jest niezbędne do obrazowania ze względu na przenikliwość, to promieniowanie beta jest idealne w leczeniu, gdyż deponuje całą swoją energię wewnątrz organizmu, wywołując jednocześnie efekt terapeutyczny. Czyste emitory beta, takie jak ^{90}Itr , nie powodują wielu problemów związanych z ochroną pracowników lub pacjentów przed promieniowaniem, chociaż ich spożycie może być bardziej niebezpieczne niż radioizotopów stosowanych do celów diagnostycznych.

Najczęściej stosowanym radioizotopem jest ^{131}Jod (w postaci jodku), który jest wykorzystywany do leczenia nadczynności tarczycy lub raka tarczycy. ^{131}I emituje zarówno promieniowanie beta, jak i gamma. Obecność promieniowania gamma jest niewątpliwie korzystna, gdyż pozwala obrazować biodystrybucję radioizotopu, jednak stwarza problemy z ochroną przed promieniowaniem. Przy półokresie rozpadu, wynoszącym niewiele ponad osiem dni i emisji promieniowania gamma o energii 364 keV, ^{131}I jest źródłem promieniowania o aktywności często tysięcy MBq. Wymaga to osłony ołowianej o grubości kilku centymetrów, by osłabić promieniowanie do poziomów dających się kontrolować, które jednak ciągle będą stanowić zagrożenie przez kilka miesięcy. Źródło ^{131}I o aktywności 1 MBq emituje promieniowanie gamma

o energii prawie trzykrotnie wyższej niż źródło ^{99m}Tc o tej samej aktywności.

U chorych, którym podaje się ^{131}I , jego aktywność może być wykryta w pocie oraz innych płynach ustrojowych, dlatego wszystkie przedmioty dotykane przez pacjenta, np. gazety, papierowe chusteczki, mogą stać się potencjalnym źródłem skażenia dla innych osób. W niektórych krajach (np. Wielkiej Brytanii) chory leczony z powodu nadczynności tarczycy zazwyczaj wraca do domu, dokładnie poinstruowany, jak zmniejszyć narażenie na promieniowanie osób znajdujących się w jego otoczeniu. W przypadku leczenia chorych na raka tarczycy aktywność ^{131}I jest dziesięciokrotnie większa i pacjent musi pozostać w szpitalu kilka dni, a czasem nawet dłużej, do momentu gdy aktywność osiągnie poziom, przy którym narażenie innych osób na promieniowanie nie przekroczy dopuszczalnych rocznych norm. W domu rodzina i przyjaciele będą co najwyżej narażeni na przebywanie z jednym pacjentem w ciągu roku. Natomiast w szpitalu personel medyczny ma styczność z wieloma pacjentami w tym samym czasie.

Jednym z zadań fizyków medycznych zajmujących się tego rodzaju leczeniem jest oszacowanie prawdopodobnego narażenia na promieniowanie w każdej z tych sytuacji oraz opracowanie odpowiednich wytycznych i wskazówek dla personelu medycznego, a także pacjentów, ich krewnych i przyjaciół. Nawet wtedy, gdy nie ma rozbieżności co do poziomów dawek promieniowania, jakie pacjent może emitować ani wielkości skażenia, jakie może wystąpić, wytyczne i wskazówki mogą się różnić. Czasem powód jest dość prosty. Wydaje się, że pacjenci w Stanach Zjednoczonych, częściej niż w innych krajach, są wypisywani do domu, gdy aktywność radiofarmaceutyku w ich organizmach jest znacznie wyższa. Jedną z przyczyn jest fakt, że mieszkają w większych domach, które posiadają więcej łazienek i tym samym niebezpieczeństwo skażenia innych członków rodziny jest mniejsze. Innym przypuszczalnym powodem jest wysoki koszt hospitalizacji pacjenta niewymagającego opieki pielęgniarskiej. Nawet w Unii Europejskiej, gdzie obowiązuje jednolite prawo, istnieją różnice w wytycznych i wskazówkach pomiędzy państwami, a nawet ośrodkami w jednym państwie. Wynikają one między innymi z dostępności miejsc w szpitalach przeznaczonych na takie leczenie, standardów opieki pielęgniarskiej, systemu opieki zdrowotnej i społecznego postrzegania radioaktywności.

Pozytonowa tomografia emisyjna

Dotychczasowe rozważania dotyczyły tylko emiterów beta-. Natomiast PET (pozytonowa tomografia emisyjna) wykorzystuje emiter beta+. Pozytrony, zaliczane do antymaterii, są cząsteczkami beta o znacznym ładunku. Wskutek zderzenia pozytronu z elektronem dochodzi do anihilacji i emisji promieniowania gamma o energii 511 keV. Nieosłonięte źródła, np. mocz pacjenta, są niebezpiecznymi źródłami emiterów beta. Należy pamiętać, że źródło $^{18}\text{Fluoru}$ o aktywności 1 MBq emituje promie-

niowanie o energii około siedem razy wyższej niż źródło ^{99m}Tc o tej samej aktywności.

Jedną z nadal nierozwiązanych kontrowersji jest pytanie, czy wybierać osłony do strzykawek Perspex® (dla emiterów beta), ołowiane lub wolframowe (dla emiterów gamma), czy ich mieszkankę. Część autorów [4, str. 252] zaleca Perspex®, ale obecnie producenci osłon reklamują tylko osłony wolframowe. Porównanie opublikowanych danych może być utrudnione, ponieważ ich autorzy dokonali oceny skuteczności osłon tylko tych strzykawek, do których mieli dostęp i nie zawsze podawali ich grubość. Niektórzy oceniają również stopień osłabienia promieniowania przez osłony, nie biorąc pod uwagę, że są one coraz grubsze i mniej poręczne. Z nieopublikowanych prac (patrz podziękowania) można wywnioskować, że optymalnym rozwiązaniem są dostępne obecnie na rynku grubsze (6-9 mm) osłony wolframowe.

Emitery beta+ cechują się krótkim półokresem rozpadu. Dla najbardziej rozpowszechnionego ^{18}F Fluoru (w postaci FDG: fluorodezoksylukozy) wynosi on tylko 1,8 godziny, dlatego też usuwanie jakiegokolwiek dużego wycieku najlepiej odłożyć do następnego dnia.

Różne przykłady pracy pracowni medycyny nuklearnej, przedstawione powyżej, wiążą się z różnymi wielkościami typowych dawek promieniowania dla personelu. W pracowniach, w których wykonuje się stosunkowo mało badań obrazowych (również badań PET), nie prowadzi się badań naukowych ani leczenia, można spodziewać się dawek około 1 mSv na rok dla całego ciała. Jeśli uwzględni się typowe leczenie chorych, dawka może wzrosnąć do 2 mSv na rok. Jednakże technicy zatrudnieni w ośrodkach wykonujących dużo badań PET mogą otrzymywać dawki 3-4 mSv na rok i nadal spełniać wymogi prawa o ochronie przed promieniowaniem jonizującym. Oczywiście przy założeniu, że nie uwzględnia się kontaktu z radiofarmaceutykami, gdyż wtedy dawki mogą być dużo większe. Pracownicy muszą podlegać klasyfikacji, jeśli narażeni są na napromienienie całego ciała dawką przekraczającą 6 mSv na rok.

Istnieje również problem stosowania odpowiednich dozymetrów do oceny dawki promieniowania na całe ciało. Przed użyciem dozymetrów wykorzystywanych zwykle w pracowniach rentgenowskich, należy upewnić się, czy uwzględniają one wartości dawek spotykanych w medycynie nuklearnej, gdyż stopień zaczernienia kliszy dozymetru jest zależny od energii promieniowania. Wyciek substancji promieniotwórczej na kliszę (dawkomierz) jest z jednej strony łatwo rozpoznawalny, a z drugiej jest odczytywany jako znaczne przedawkowanie. Natomiast dozymetry TLD rejestrują promieniowanie niezależnie od jego energii, ale nie podają żadnych informacji na temat skażenia. Jednym z najlepszych sposobów zmniejszenia narażenia na promieniowanie w pracowni medycyny nuklearnej jest zaopatrzenie pracowników w dozymetry cyfrowe, których odczyty mogą oni wykorzystywać do bieżącej modyfikacji swojego postępowania, bez przerywania pracy.

Typowe dawki promieniowania dla pracowników, opisane wcześniej, zostały zaczerpnięte z prowadzonego

przez wiele lat rejestru faktycznych dawek. W następnym paragrafie opisano technikę na tyle nową, że jej wpływ na pracowników nie został jeszcze oceniony, choć biorąc pod uwagę obowiązujące standardy ochrony radiologicznej nie powinien być znaczący.

Emitery Alfa

W ostatnich latach przeprowadzono kilka badań klinicznych z użyciem emiterów alfa, w tym najpowszechniej stosowanego ^{223}Ra (jako roztworu chlorku radu), w leczeniu bólu wywołanego przerzutami raka gruczołu krokowego do kości. Gdy w 2002 r. publikowano *Medical and Dental Guidance Notes*, nie przewidywano ponownego wprowadzenia emiterów alfa do leczenia [5]. Informacji dotyczących tego zagadnienia jest wciąż stosunkowo niewiele [6].

Strzykawki zawierające ^{223}Ra są łatwe do osłonięcia, ponieważ istnieje tylko niewielka emisja promieniowania gamma o średniej lub wysokiej energii. Wyższa skuteczność biologiczna cząstek alfa oznacza, że potrzebne są źródła o stosunkowo niskiej aktywności, w porównaniu z innymi metodami leczenia. Stąd też niskie poziomy dawek promieniowania pochodzących od pacjenta. Największe niebezpieczeństwo dla pracowników stanowi ryzyko skażenia. Cząsteczki alfa są trudne do wykrycia nawet przy użyciu specjalistycznego sprzętu.

W odróżnieniu od ^{223}Ra , ^{210}Po jest prawie czystym emiterym alfa [7]. Brak wykrywalnego promieniowania tłumaczy, dlaczego tak długi okres czasu zabrało śledczym w Wielkiej Brytanii w 2006 r. ustalenie przyczyny nagłego pogorszenia stanu zdrowia, a następnie śmierci Alexandra Litwinienki, a które spowodowane były ogromną ilością ^{210}Po [8]. Chociaż personel medyczny opiekujący się nim był nieświadomy obecności materiału radioaktywnego, to zastosowanie standardowych środków ostrożności było wystarczające. Tylko u kilku pracowników stwierdzono minimalny wzrost aktywności ^{210}Po , która nie stanowiła zagrożenia dla ich zdrowia [9]. Potwierdza to zasadność informacji dla personelu medycznego opiekującego się pacjentami przechodzącymi jakiegokolwiek leczenie otwartymi źródłami radioaktywnymi, że zwyczajne środki ostrożności są wystarczające do ochrony przed skażeniem.

Podziękowania

Jestem wdzięczna dwóm byłym pracownikom z The Christie (NHS Foundation Trust) w Manchesterze: Brian'owi Murby za informacje dotyczące zastosowania emiterów alfa i Deb Tout za informacje dotyczące PET oraz Ian'owi Armstrong'owi za informacje na temat osłon strzykawek do PET oraz pomoc w przygotowaniu artykułu. Deb Tout i Ian Armstrong obecnie pracują w szpitalu Manchester Royal.

Mrs Marjorie R. Rose BSc, MPhil, FIPeM, MSRP
Rose Cottage
Small Dale
Buxton
Derbyshire SK17 8EA
e-mail: margeanddavidrose@btinternet.com

Piśmiennictwo

1. <http://www.bnms.org.uk/>
2. <https://www.eanm.org/>
3. <http://interactive.snm.org/>
4. Martin CJ, Sutton DG, eds. *Practical Radiation Protection in Health Care*. Oxford: Oxford University Press, 2002.
5. *Medical and Dental Guidance Notes*. Institute of Physics and Engineering in Medicine, York: IPEM, 2002.
6. Sgouros G. Alpha-particles for targeted therapy. *Adv Drug Deliv Rev* 2008; 60: 1402-6. Epub 2008 Apr 23. doi:10.1016/j.addr.2008.04.007
7. Mould RF. ²¹⁰Polonium. *Nowotwory J Oncol* 2008; 58: 193e-196e – [www.nowotwory.edu.pl/files/pdf/2008/plik_193eMould – Polonium.pdf](http://www.nowotwory.edu.pl/files/pdf/2008/plik_193eMould-Polonium.pdf)
8. Harrison J, Leggett R, Lloyd D, Phipps A, Scott B. ²¹⁰Polonium as a poison. *J Radiol Prot* 2008 Mar; 27 (1): 17-40. Epub 2007 Mar 6.
9. From [http://www.hpa.org.uk/click on Radiation](http://www.hpa.org.uk/click_on_Radiation) | Understanding Radiation | Understanding Radiation – Topics

Otrzymano i przyjęto do druku: 30 października 2009 r.